论文

题目　　基于防雷接地需求的土壤结构模型研究

作　　者　李豆豆

指导老师　曹恒阁

学校名称　郑州一高

摘要：土壤电阻率是影响接地阻抗的主要因素之一，它对防雷接地的效果起着重要的作用。基于遗传算法针对比较常见的简单 2 层水平分层土壤建立并分析了土壤分层结构的电阻率模型，证明了复镜像法在土壤反演应用中仍然很有效，可以对各种复杂土壤分层进行反演，通过实例并与国际著名软件包 CDEGS 的计算结果进行对比，充分验证了本方法的有效性。

关键词：防雷，土壤结构，模型，研究

Abstract：Grounding resistance is one of the most important parameters to evaluate the performance of grounding system. The contrast of classification of soil resistivity’s measurement is done; Using the improved genetic algorithm and complex image method, it builds the layer model soil, after the verify by the soil resistivity measuring data and comparing the result with the world-renowned software,it shows the validity of the model. The building of the model facilitate the grounding system design and construction.

目录

1 、引言…………………………………………………………4

2、基于遗传算法两层土壤结构模型的建立……………………………5

3、模型验证…………………………………………………9

4、 结束语……………………………………………..…11

5、参考文献…………………………………………………11

基于防雷接地需求的土壤结构模型研究

0 引言

土壤电阻率是影响接地阻抗的最重要因素之一，防雷接地的设计必须对项目所在地的岩土电阻率有一个全面的了解。1921 年 Schlumberger 在法国将研究地下物质的电阻率应用于实际测量当中，方法是向已知深度的地下导入电流，然后测量出不同深度的电阻率，这种方法是研究地下浅层物质的最有效方法之一。它能够探测地下几米到几百米距离内的地下物质及地质结构电阻率。甚至能帮助区分地下物质的种类、覆盖层的构成及基岩深度，确定砂、金属沉积物及地下水层的厚度与深度，探测断层带等。

土壤电阻率ρ是决定接地电阻的主要因素。根据测量得到的土壤电阻率对接地装置进行设计，使接地电阻能够满足防雷、电力保障设备的正常运行，并使接地装置之上的跨步电压能够满足对人体安全的要求。[2]因为接地装置的接地电阻主要是深层土壤电阻率的函数，而接触电压和跨步电压主要是接地装置上面的表层土壤的土壤电阻率的函数。

张波以及清华大学杨慧娜分别利用频域电磁场数值计算方法对变电站接地网进行了研究[1]。研究工作的缺陷是没有考虑接地体周围土壤在雷电冲击电流作用下产生的非线性电击穿的影响。鲁志伟对工

频电流对发变电站接地系统的影响以及接地网等电位和不等电位的数值计算方法做了深入的研究[2]。

M.NabLtnan介绍了双层土壤中复合接地网的接地电阻以及接触电压和跨步电压的解析计算公式[3]；加拿大Waterloo大学的Y. L. Chow教授研究了均匀土壤和双层土壤中水平地网接地电阻的解析计算公式[4]。2004 年加拿大的F. P. Dawalibi教授在第七届国际科学与技术发展会议上发表了双层土壤接地系统系能的详细参数分析，对双层土壤中的典型接地系统的接地电阻，跨步电压和接触电压性能以及影响参量做了研究，并提出了一些需进一步研究的问题[5]。

土壤电阻率是防雷工程设计的重要参数，也是估算接地电阻、地面电位梯度、跨步电压、接触电压，计算相邻近的电力线路和通信线路间电感耦合的重要参数之一，是分析雷电灾害事故、总结防雷经验的重要参考。正因为土壤电阻率对接地的重要性，在进行接地设计与施工前，对土壤电阻率的测试以及对测试数据的分析显得尤为重要，但局限于目前对土壤电阻率的测试方法，测试得到的土壤电阻率实际为视在电阻率，不是实际土层的真实电阻率，目前只有通过测试得到的视在土壤率，通过数值的，经验的方法来确定土壤的分层，以及每层土壤的大概厚度与电阻率。本文通过对测量数据分析方法的比较，得出适合不同类型土壤的合理算法，建立合理的土壤结构模型，为接地设计和施工提供基础资料。

1　基于遗传算法两层土壤结构模型的建立

土壤电阻率是影响接地阻抗的主要因素之一。土壤的类型，含水量和化学成份不同，土壤电阻率可以在很大范围内变化。传统的接地网分析方法是将实际不均匀的土壤视为均匀的结构。当接地网的占地面积很大，故障时大部分电流会经地下深层土壤流走。所以在接地网设计之前，需要从电阻率的角度，对接地网所在的土壤结构有深入的了解。

1.1　建模基础

使用文纳等距四极法测得的土壤电阻率，是在土壤不均匀性综合作用下一个视在电阻率，不是土壤电阻率的真值，它随土壤结构和测量极间距的变化而变化。当极间距很小时，绝大部分电流从表层土壤流过，测得的视在电阻率接近表层土壤的实际电阻率。随着极间距的增大，电流将从深层土壤通过，测出的土壤电阻率将逐渐反映深层土壤电阻率的情况。所以工程上，将 2 个电流测量探针极间距视作测量深度。正是由于等距四极法测得的土壤视在电阻率随土壤结构和极间距的变化而变化，因而可以通过一组视在电阻率值，依据恒定电磁场理论和数学手段，用计算软件来反演出土壤结构的参数。

利用文纳四极法测量得到的土壤数据作为建立土壤模型的基础数据，其测量布线如图 1 所示：

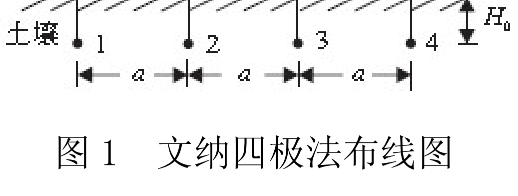

图 1　文纳四极法布线图

图 1 中，a是测量探针极间距，H_0是电极的深度，1 和 4 电极是电流极，2 和 3 是电压极，四个电极位于同一直线，则对于均匀土壤有[29]：

当 H_0 =0 时： $\rho_a = \frac{2\pi a V_{23}}{I}$

（1）

当$H_0 \neq 0$时， $V_{23} = \frac{\rho I}{4\pi}[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2H_0)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2H_0)^2}}]$ （2）

$$\rho = \frac{4\pi a \frac{V_{23}}{I}}{\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2H_0)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2H_0)^2}}} \qquad (3)$$

以上公式是针对土壤结构均匀的情况，当土壤结构不均匀时，以上情况不成立。

将图 1 当作一个多层水平分层的土壤模型。通常四个电极都会打在不深的地表，可认为四个电极位于第一层的同一水平面，土壤电阻率是用式(1)求得。在多层土壤下，它就是视在电阻率。点电流源在地表面第一层土壤的电位表达如下式[30]：

$$\phi = \frac{\rho_1 I}{4\pi}\int_0^\infty \{[1 + A_1(\lambda) + B_1(\lambda)J_0(\lambda_a)]\} d\lambda$$

（4 ）

当土壤为水平多层时，由上式可得使用等距四极法测得的电位V_{23}为

$$V_{23} = \frac{\rho_1 I}{4\pi}\int_0^\infty \{[1 + A_1(\lambda) + B_1(\lambda)]\bullet[J_0(\lambda_a) - J_0(2\lambda_a)]\} d\lambda \qquad (5)$$

将式 5 代人式 1 则有：

$$\rho_a = a\rho_1\int_0^{\infty}\{[1+A_1(\lambda)+B_1(\lambda)]\bullet[J_0(\lambda_a)-J_0(2\lambda_a)]\}d\lambda \qquad (6)$$

由递推法可知，待定系数$A_1(\lambda)$和$B_1(\lambda)$B（λ）与多层土壤的每层电阻率和深度有关，所以视在电阻率是土壤各个参数的函数。当h_0=0 时，式 6 就变为下式：

$$\rho_a = a\rho_1\int_0^{\infty}\{[1+B_1(\lambda)]\bullet[J_0(\lambda_a)-J_0(2\lambda_a)]\}d\lambda$$

（7）

将式 6 中的待定系数$A_1(\lambda)$和$B_1(\lambda)$B（λ）利用复镜像法展开，可将视在电阻率进一步简化为：

$$\rho_a = a\rho_1(A+B)$$

（8）

$$A=\frac{1}{2a}+\frac{1}{\sqrt{a^2+(2H_0)^2}}-\frac{1}{\sqrt{(2a)^2+(2H_0)^2}}$$

（9）

$$B=\sum_{j=1}^{N}c_i[\frac{1}{\sqrt{a_j{}^2+d_i{}^2}}-\frac{1}{\sqrt{(2a_j)^2+d_i{}^2}}+\frac{1}{\sqrt{a_j{}^2+(d_i-2H_0)^2}}-\frac{1}{\sqrt{(2a_j)^2+(d_i-2H_0)^2}}] \qquad (10)$$

式中：a是极间距；H_0是测量电极的埋深，c_i和d_i是复镜像源的大小和位置。

1.2　目标函数的建立与优化

目标函数的建立，测得 m 个视在电阻率的数值，应能找到一套土壤结构的参数使下式成立：

$$f(x')=\sum_{i=0}^{m}[\frac{\rho_{ci}-\rho_{mi}}{\rho_{mi}}]^2=\min$$

（11）

式中ρ_{mi}是指极间距为a_i时的测量值；ρ_{ci}是指极间距为a_i时，通过复镜像法算出来的计算值，x'是列向量，表达式如下：

$$x' = (H_1, H_2, \cdots, H_{n-1}, \rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n)$$

（12）

目标函数$f(x')$是计算土壤电阻率ρ_{ci}和实测土壤电阻率的相对方差，寻优目的是要令方差最小。

在本模型中通过改进遗传算法实现方差最小化。遗传算法以编码空间代替问题的参数空间，以适应度函数为评价依据，以编码群体为进化基础，以对群体中个体位串的遗传操作实现选择和遗传机制，建立起一个迭代过程[6-7]。在这一过程中，通过随机重组编码位串中重要的基因，使新一代的位串集合优化于老一代的位串集合，群体的个体不断进化，逐渐接近最优解，最终达到求解问题的目的。在土壤参数反演计算最优化过程中，遗传算法的参数设定为各层土壤电阻率、各层土壤厚度；编码方式选择浮点数编码法；适应度为式 11 中$f(x')$。遗传策略中的三个基本算子分别选取赌盘选择算子、单点配对交叉算子、随机变异子。将遗传算法用于求解最优化问题，与经典优化算法不同的特点在于，遗传算法是从多个初始点开始寻优，沿多路径搜索实现全局或准全局最优。

2　　**模型验证**

实例验证：两层土壤，表 1 列出了一组使用等距四极法测得的土壤视在电阻率测量结果，使用多层水平分层土壤电阻率模型建立方法和 CDEGS 软件包分别对该测量结果进行分析，得到了如表 2 所示的两

层土壤结构。遗传参数选取如下：群体规模为 300，最大代数 600，交叉概率 0.68、变异概率 P=4.95%。

表 1　视在电阻率的测量值

极间距离（m）	1.0	5.0	10.0	25.0	50.0	80.0	120.0	200.0	300.0
视在电阻率Ω•m	32.6	35	41.6	70.1	100.2	113.5	138.5	212.6	261.5

表 2　分析结果

层数	模型结果		软件 CDEGS 结果	
	电阻率	土壤厚度	电阻率	土壤厚度
1	34.33	20.28	37.15	21.3
2	301.45	∞	294.7	∞

根据实际测量数据、反演出最优结果和 CDEGS 软件分析结果绘制出的随测量极距变化的视在电阻率变化曲线如图 2：

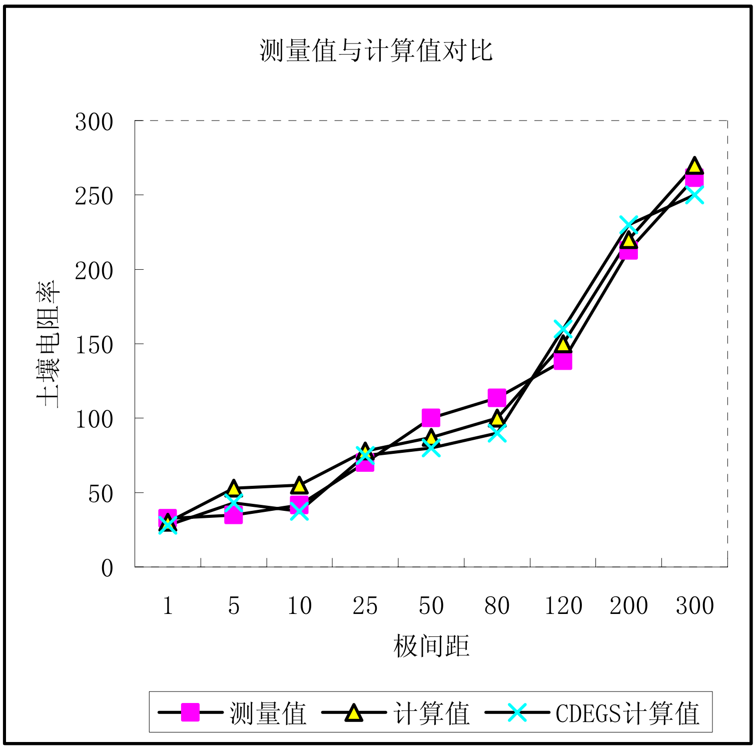

图 2　　视在电阻率测量值和计算值的比较

3 结束语

接地系统的性能和包围在它周围的土壤电阻率密切相关，根据土壤电阻率的测量原理，能够通过分析测量数据，反演出土壤的分层结构。土壤电阻率的测量方法随有很多，但各有长短，应该针对不同的情况采用不同的测量方法，可以利用测得的视在土壤电阻率通过遗传算法建立模型反演土壤的分层结构。通过验证和与 CDEGS 软件计算结果的对比，可知方法选择恰当可以得到很好的反演效果。

参考文献

[1]　杨慧娜.大地模型的确定与接地网暂态模拟计算：[博士学位论文].北京.清华大学，2003

[2] 鲁志伟 大型接地网工频接地参数的计算和测量 [博士学位论文] 武汉大学 2004

[3] M. M. A Salama Y. L. Chow. A formula for resistance of substation grounding grid in two-layer soil [J] IEEE Transactions on Power Delivery,1995，10(3):1255-1262.

[4] Y. L. Chow，M. M. A Salama. A simplified method for calculating the substation grounding Grids resistance [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994,9(2):736-741

[5] F.P.Dawalibi, W.G.Finney. Transmission Line Tower Grounding Performance in Non Uniform Soil.IEEE Trans. on PAS,1980,99(2);471-479.

[6] K.C.Tan,T.H.Lee,Y.J.Yang, et al. A Cooperative Coevolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization．IEEE International Conference on Systems,Man and Cybernetics. 2004, :1926-1931.

[7] Takehiko t. calculation of earth resistivity for a deep-driven rod in a multi-layer earth structure[j]．ieee transaction on power delivery, 1991, 6 (2) :608-614.